

## 축소형 가스발생기 연소안정성 특성

안규복\* · 강동혁\* · 김문기\* · 임병직\* · 김종규\* · 최환석\*

# Combustion Stability Characteristics in Sub-scale Gas Generator

Kyubok Ahn\* · Donghyuk Kang\* · Munki Kim\* ·  
Byoungjik Lim\* · Jong-Gyu Kim\* · Hwan-Seok Choi\*

### ABSTRACT

Hot-firing tests were performed on the third sub-scale gas generator for development of a 75 ton-class liquid rocket engine. This paper deals with the analysis results of low-frequency combustion instabilities that were encountered during combustion tests of the gas generator. The low-frequency pressure fluctuations seem to be related to chamber pressure and pressure drops through oxidizer/fuel injectors.

### 초 록

추력 75톤급 액체로켓엔진용 가스발생기의 초기 검증을 위한 세 번째 축소형 모델에서 연소시험이 수행되었다. 본 논문에서는 세 번째 축소형 가스발생기 모델의 연소시험 중 발생한 저주파 연소불안정에 대한 분석 결과를 기술하였다. 이러한 저주파 압력섭동은 연소실 압력, 산화제/연료 분사기의 차압과 연관된 것으로 판단된다.

Key Words: Gas Generator(가스발생기), Combustion Stability(연소안정성), Swirl Coaxial Injector(동축 와류형 분사기)

### 1. 서 론

Open-cycle 액체로켓엔진에서는 추진제를 연소기로 전달하는 터보펌프를 구동하기 위해 가스발생기가 사용되고 있다[1]. 한국항공우주연구원에서는 75톤급 액체로켓엔진용 가스발생기의

개발이 진행되고 있다[2]. 초기 단계로 연료과농 조건에서 작동하는 동축 와류형 분사기의 성능 및 안정성을 파악하기 위해 분사기의 수를 줄인 축소형 가스발생기를 설계, 제작하여 연소시험을 수행하고 있다[3-5].

동축 와류형 분사기가 사용된 연소기의 경우도 다른 형태의 분사기가 적용된 연소기들과 마찬가지로 특정 조건에서 저주파 연소불안정 문제가 된다고 알려져 있다[6, 7]. 가스발생기의

\* 한국항공우주연구원 연소기팀  
교신저자, E-mail: kbahn@kari.re.kr

경우 실질적인 연소실은 터보펌프 매니폴드 공간을 포함하기 때문에 일반적으로 축방향 연소 불안정이 발생하기 쉽다[8, 9]. 하지만 축소형 가스발생기 연소시험에서도 연소기와 마찬가지로 연소실 압력이 낮은 영역에서 저주파 연소불안정이 발생하였다. 본 논문에서는 이러한 가스발생기 연소시험에서 발생하는 저주파 압력섭동에 대해 살펴보았다.

## 2. 가스발생기 및 시험조건

축소형 가스발생기의 헤드와 연소실은 조립형으로 제작되었다. 동축 와류형 분사기는 Fig. 1에 나타나 있듯이 중심에 1개, 1열에 6개로 총 7개가 배치되었다. 실물형 가스발생기와 주요 설계인자를 맞추기 위해 연소실 직경 및 길이가 결정되었다. 또한 연소실 끝단에 압력을 맞추기 위한 음속 노즐을 장착하여 터빈매니폴드 노즐을 모사하였다.

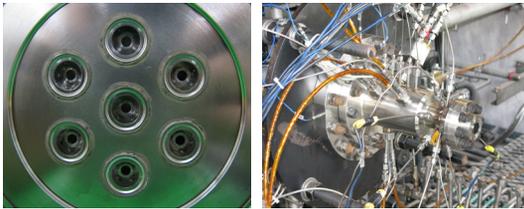


Fig. 1 Sub-scale gas generator

가스발생기 연소시험에서 얻어진 혼합비, 연소실 압력 결과를 Fig. 2에 빨간색 원으로 표시하였다. Figure 2에서 파란색 다이아몬드는 가스발생기 연소시험이 이루어지는 설계점 및 탈설계점 조건을 의미하며, 탈설계점은 설계점 기준 연소실 압력 16%, 혼합비 10% 변경 조건으로 설정하였다. 연소시험은 설계점(연소실 압력 58 bar, 혼합비 0.321)을 기준으로 혼합비 및 연소실 압력을 독립적으로 변경하여 6번을 수행하였으며, 저압에서의 저주파 압력섭동을 살펴보기 위해 저압 조건에서 혼합비를 변경하며 3번의 연소시험이 추가로 이루어졌다.

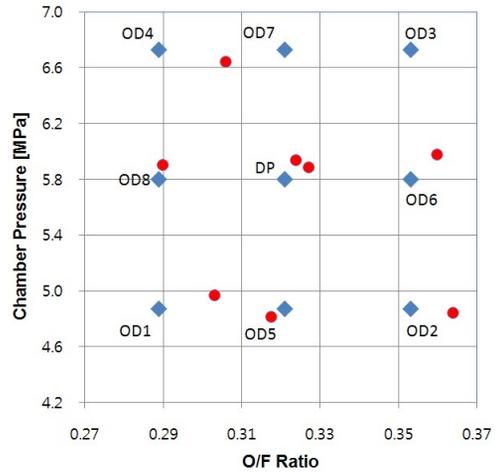


Fig. 2 Test conditions of sub-scale gas generator

## 3. 연소시험 결과 및 검토

Figure 2의 탈설계점5(OD5)에서 수행된 연소시험 결과 중 시간에 따른 연소실 압력섭동 데이터의 RMS(root mean square) 값을 Fig. 3에 도시하였다. 연소실 압력섭동은 연소 시작 후 1.5초 정도부터 갑자기 커지기 시작해서 연료 종료 시까지 지속되고 있다. 연소불안정 구간에서의 파워스펙트럼 결과를 Fig. 4에 도시하였는데 150 Hz 대역의 저주파 압력섭동이 매우 큰 강도로 발생하고 있으며, peak-to-peak 기준으로 섭동의 크기는 10 bar로 연소실 압력의 20%에 이르렀다.

축소형 가스발생기 연소시험에서 발생하는 이러한 저주파 연소불안정을 보다 심도 있게 살펴보기 위해 9번의 연소시험에서 얻은 연소실 압력섭동의 RMS 값을 연소실 압력으로 정규화하여 Fig. 5에 도시하였다. 또한 최대 파워스펙트럼을 갖는 주파수를 Fig. 6에 나타내었다. 연소실 압력이 산화제 임계압력인 50.4 bar 보다 낮은 경우 압력섭동의 RMS 값은 연소실 압력의 5%에 이르렀으며, 이때 최대 파워스펙트럼을 갖는 주파수는 모두 146 Hz로 나타났다. 이에 반해 연소실 압력이 임계압력 보다 높은 경우 RMS 값은 연소실 압력의 대략 2% 미만의 값을

나타내었으며, 최대 파워스펙트럼 주파수는 조건에 따라 변동하고 있음을 알 수 있다. 산화제 임계압력을 기준으로 하는 이러한 저주파 섭동의 특성은 액체산소와 수소를 추진제로 하는 동축 전단형 분사기(shear coaxial injector)에서도 보고되었다[10].

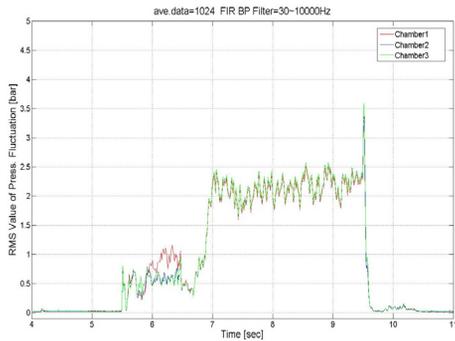


Fig. 3 RMS values of filtered chamber pressure fluctuations at OD5

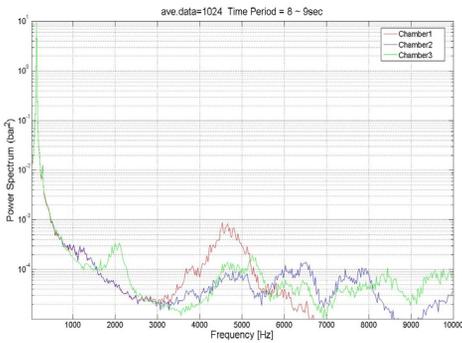


Fig. 4 Power spectral densities of filtered chamber pressure fluctuations at OD5

연소실 압력섭동의 RMS 값을 산화제, 연료 분사기 차압의 함수로 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 과도한 연료과농 조건에서 작동하는 가스 발생기의 경우 연소실 압력은 산화제 유량에 비례하게 되며 이에 따라 Fig. 7은 Fig. 5와 매우 유사해 보인다. Figure 8을 살펴보면 연료 분사기 차압이 연소실 압력의 14% 이하에서는 분사기 차압이 감소함에 따라 압력섭동의 강도가 증

가하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 두 번째 축소형 가스발생기 모델의 연소시험에서 나타난 현상과 일치한다[5]. 따라서 연료과농 조건에서 작동하는 동축 와류형 분사기에서 발생하는 저주파 연소불안정의 경우, 산화제 임계압력 이상으로의 연소실 압력 증가와 함께 연료 분사기 차압 증가가 해결책이 될 수 있는 가능성을 시사하고 있다.

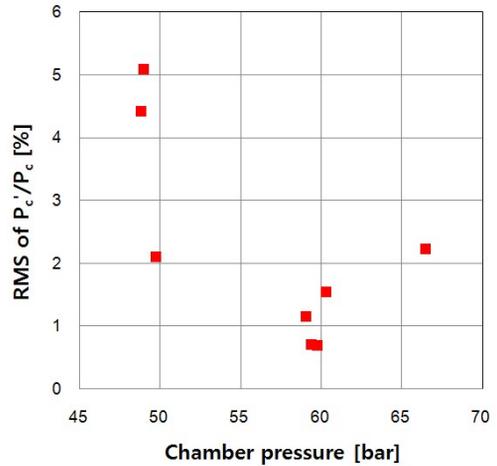


Fig. 5 Pressure fluctuation data normalized by chamber pressure as a function of chamber pressure

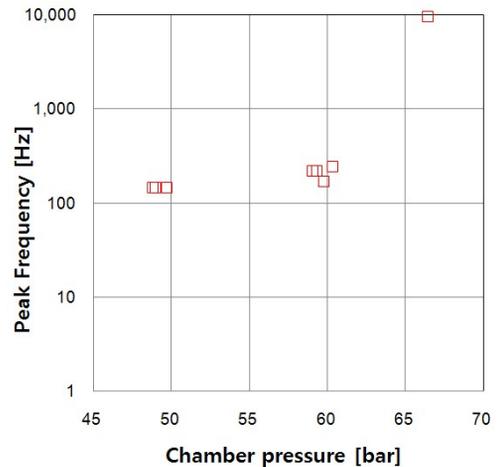


Fig. 6 Peak frequencies in filtered chamber pressure fluctuations as a function of chamber pressure

## 참 고 문 헌

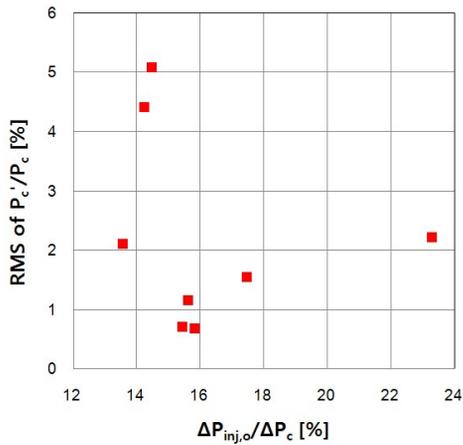


Fig. 7 Normalized RMS values of chamber pressure fluctuation data as a function of normalized oxidizer injector pressure drop

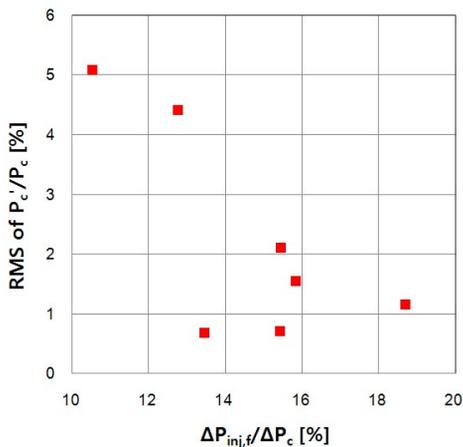


Fig. 8 Normalized RMS values of chamber pressure fluctuation data as a function of normalized fuel injector pressure drop

## 4. 결 론

세 번째 축소형 가스발생기 모델에서 연소시험이 수행되었으며, 연소시험에서 발생한 저주파 연소불안정 현상을 분석하였다. 동축 와류형 분사기를 사용한 연료과농 조건에서 작동하는 가스발생기의 경우 연소실 압력 및 연료 분사기 차압이 저주파 섭동에 매우 중요한 요소임을 다시 한 번 확인 할 수 있었다.

1. 홍용식, 우주추진공학, 청문각, pp.143-149
2. 안규복 외, "75톤급 가스발생기 기술검증시험의 연소시험," 제33회 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2009, pp.225-228
3. 서성현 외, "작동 조건에 따른 이중 와류 분사기 유량 계수 변화 연구," 제34회 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2010, pp.177-180
4. 김문기 외, "75톤급 액체로켓엔진 축소형 가스발생기 연소시험," 제34회 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2010, pp.173-176
5. 안규복 외, "축소형 가스발생기 연소안정성 연구," 제35회 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2010, pp. 594-596
6. Ahn et al., "Effects of Injector Recess and Chamber Pressure on Combustion Characteristics of Liquid-Liquid Swirl Coaxial Injectors," Combustion Science and Technology, Vol. 183, No. 3, 2011, pp.252-270
7. 안규복 외, "연소실 압력 변화에 따른 연소기 압력 섭동 분석," 한국추진공학회지, 제14권, 제5호, 2010, pp.8-14
8. Seo et al., "Combustion Dynamics and Stability of a Fuel-Rich Gas Generator," Journal of Propulsion and Power, Vol. 26, No. 2, 2010, pp.259-266
9. Ahn et al., "Fuel-Rich Combustion Characteristics of Bi-Swirl Coaxial Injectors," To be published in Journal of Propulsion and Power, 2011
10. Smith et al., "High Pressure LOx/H2 Combustion and Flame Dynamics Preliminary Results," AIAA-2004-3376, 2004